NOTICE

SUR LES

TRAVAUX SCIENTIFIQUES

DE

M. MARCEL BERTRAND,

INGÉNIEUR EN CHEF DES MINES.

PARIS,

GAUTHIER-VILLARS ET FILS, IMPRIMEURS-LIBRAIRES

DU BUREAU DES LONGITUDES, DE L'ÉCOLE POLYTECHNIQUE,

Quai des Grands-Augustins, 55.

1894

Elève de l'École Polytechnique (1867-1869);

Élève-Ingénieur des Mines (1869-1872);

Ingénieur ordinaire des Mines (1872); Ingénieur en chef des Mines (1886);

Attaché au Service de la Carte géologique de France (1877);

Professeur de Géologie à l'École des Mines (1886);

Vice-Président de la Société géologique en 1886 et en 1891;

Président de la Société géologique en 1891;

Président de la réunion extraordinaire du Jura en 1885 et de la réunion extraordinaire de Provence en 1891;

Premier lauréat du prix Fontannes (décerné par la Société géologique au meilleur ouvrage stratigraphique), en 1888.

Récompenses académiques : en 1886, prix Vaillant partagé avec les autres membres de la mission d'Andalousie;

En 1890, prix Vaillant (*Mémoire sur le rôle des déplacements horizontaux*);

En 1893, prix Petit-d'Ormoy (*Mémoires sur la déformation de l'écorce terrestre et sur le bassin houiller du Nord*).

LISTE DES PUBLICATIONS.

NOTES ET MÉMOIRES.

1880.

1. Légende de la feuille de Gray.

1881.

2. Failles de la lisière du Jura entre Besançon et Salins; *Bull. Soc. Géol.*, t. X, p. 114.
3. Légende de la feuille de Besançon.

1882.

4. Sur l'âge des terrains bressans; *Bull. Soc. Géol.*, t. X, p. 256.

1883.

5. Le jurassique supérieur et ses niveaux coralliens entre Gray et Saint-Claude; *Bull. Soc. Géol.*, t. XI, p. 164.
6. Observations sur une Note de M. Chaignon; *Bull. Soc. Géol.*, t. XI, p. 240.
7. Sondage de Salies; *Bull. Soc. Géol.*, t. XII, p. 33.

1884.

8. Rapports de structure des Alpes de Glaris et du bassin houiller du Nord; *Bull. Soc. Géol.*, t. XII, p. 318.
9. Légende de la feuille de Lons-le-Saunier.
10. Failles courbes dans le Jura et bassins d'affaissement; *Bull. Soc. Géol.*, t. XII, p. 452.

11. Coupes de la chaîne de la Sainte-Beaume (Provence); *Bull. Soc. Géol.*, t. XIII, p. 115.

1885.

12. Sur les terrains secondaires et tertiaires de l'Andalousie (en collaboration avec M. Kilian); *Comptes rendus Ac. Sc.*, 20 avril 1885.
13. Compte rendu préliminaire des études faites avec M. Kilian en Andalousie; *Bull. Soc. Géol.*, t. XIII, p. 474.
14. Existence de filons d'ophite dans le crétacé des Pyrénées; *Bull. Soc. Géol.*, t. XIII, p. 575.
15. Le bassin tertiaire de Grenade (en collaboration avec M. Kilian); *Comptes rendus Ac. Sc.*, 20 juillet 1885.
16. Compte rendu de l'excursion du 26 août, entre Morez et Saint-Claude, (réunion extraordinaire du Jura); *Bull. Soc. Géol.*, t. XIII, p. 785.
17. Observations sur une Communication de M. l'abbé Bourgeat; *id.*, *Bull. Soc. Géol.*, t. XIII, p. 801.
18. Compte rendu de l'excursion du 29 août, à Charrix; *id.*, p. 852.
19. Observations sur les niveaux coralliens; *id.*, p. 865 et 874.

1886.

20. Observations sur l'âge de la faune de Pikermi; *Bull. Soc. Géol.*, t. XIV, p. 295.
21. Légende de la feuille de Toulon.
22. Observations sur les couches saumâtres du Revest; *Bull. Soc. Géol.*, t. XV, p. 15.

1887.

23. Sur le rôle des affaissements; *Bull. Soc. Géol.*, t. XV, p. 238.
24. Légende de la feuille de Pontarlier.
25. La chaîne des Alpes et la formation du continent européen; *Bull. Soc. Géol.*, t. XV, p. 423.
26. Rôle des actions mécaniques en Provence; explication de l'anomalie stratigraphique du Beausset; *Comptes rendus Ac. Sc.*, 13 juin 1887.
27. Sur la découverte, faite par MM. Abel Girardot et Buchin, d'un gisement à végétaux terrestres, près de Lons-le-Saunier; *Bull. Soc. Géol.*, t. XV, p. 667.
28. Ilot triasique du Beausset (Var). Analogie avec le bassin houiller franco-belge et avec les Alpes de Glaris; *Bull. Soc. Géol.*, t. XV, p. 667.

29. Compte rendu de l'excursion aux carrières de Chancelade (réunion extraordinaire des Charentes); *Bull. Soc. Géol.*, t. XV, p. 834.

30. Compte rendu de l'excursion autour de Beaumont; *id.*, p. 848.

31. Observations sur les calcaires lacustres du sud du Plateau Central; *id.*, p. 854.

32. Observations à propos d'une Note de M. Stuart-Menteath sur les Pyrénées; *Bull. Soc. Géol.*, t. XVI, p. 52.

33. Notes et additions sur le pli du Beausset; *Bull. Soc. Géol.*, t. XVI, p. 79.

1888.

34. Ilots de calcaire carbonifère dans le bassin houiller du Somerset; *Bull. Soc. Géol.*, t. XVI, p. 435.

35. Sur les bassins houillers du Plateau Central de la France; *Bull. Soc. Géol.*, t. XVI, p. 517.

36. Les plis couchés et les renversements de la Provence. Environs de Saint-Zacharie; *Comptes rendus Ac. Sc.*, 14 mai 1888.

37. Sur les relations des phénomènes éruptifs avec la formation des montagnes, et sur les lois de leur distribution; *Comptes rendus Ac. Sc.*, 21 mai 1888.

38. Sur la distribution des roches éruptives en Europe; *Bull. Soc. Géol.*, t. XVI, p. 573.

39. Allure générale des plissements des couches de la Provence; analogie avec ceux des Alpes; *Comptes rendus Ac. Sc.*, 4 juin 1888.

40. Nouvelles études sur la chaîne de la Sainte-Beaume. Allure sinueuse des plis de la Provence; *Bull. Soc. Géol.*, t. XVI, p. 748.

41. Les plis couchés de la région de Draguignan; *Comptes rendus Ac. Sc.*, 29 octobre 1888.

42. Un nouveau problème de la géologie provençale; pénétration de marnes irisées dans le crétacé; *Comptes rendus Ac. Sc.*, 26 novembre 1888.

43. Plis couchés de la région de Draguignan; *Bull. Soc. Géol.*, t. XVII, p. 234.

1889.

44. Études sur les terrains secondaires et tertiaires dans les provinces de Grenade et de Malaga (en collaboration avec M. Kilian), mission d'Andalousie; *Mémoires des Savants étrangers*, t. XXX.

45. Éloge de M. Ch. Lory; *Bull. Soc. Géol.*, t. XVII, p. 664.

46. Notice pour le panneau de la Provence et des Alpes-Maritimes, Exposition de 1889. *Notices sur les modèles et dessins relatifs aux travaux des Ponts et Chaussées et des Mines, exposition de* 1889, p. 92.

47. Notice sur le Jura; *id.*, p. 92.

48. Compte rendu de l'excursion du 18 août, à Bicêtre et à Villejuif (réunion extraordinaire de Paris); *Bull. Soc. Géol.*, t. XVII, p. 845.

49. Sur les schistes lustrés du mont Cenis; *id.*, p. 880.

1890.

50. Légende de la feuille de Marseille.

51. Allocution présidentielle; *Bull. Soc. Géol.*, t. XVIII, p. 377.

52. Mémoire sur le rôle des déplacements horizontaux. Ce Mémoire auquel l'Académie a décerné le prix Vaillant (Rapport de M. Daubrée, *Comptes rendus*, décembre 1890), et dont elle a autorisé l'insertion dans le *Recueil des Savants étrangers*, n'a pas encore été publié.

1891.

53. Observations sur la coupe du sommet de l'Ouarsenis; *Comptes rendus somm. des Séances de la Soc. Géol.*, 6 avril 1891.

54. Allocution présidentielle; *Bull. Soc. Géol.*, t. XIX, p. 265.

55. Rapport sur les travaux de M. Barrois (prix Fontannes); *Bull. Soc. Géol.*, t. XIX, p. 569.

56. Sur un témoin d'un nouveau pli couché près de Toulon; phyllades superposés au Trias (en collaboration avec M. Zurcher), *Comptes rendus Ac. Sc.*, 11 mai 1891.

57. Sur le massif d'Allauch; *Comptes rendus somm. Soc. Géol.*, 8 juin 1891.

58. Compte rendu de la course de la Ciotat et de Bandol (réunion extraordinaire du Beausset); *Bull. Soc. Géol.*, t. XIX, p. 1051.

59. Compte rendu de l'excursion au Val d'Aren, au Canadeau et au Vieux Beausset; *id.*, p. 1062.

60. Compte rendu de l'excursion au Télégraphe de la Cadière et à Fontanieu; *Id.*, p. 1077.

61. Réponse aux observations de M. Toucas; *id.*, p. 1090.

62. Sur le plissement de la nappe de recouvrement du Beausset; *id.*, p. 1096.

63. Compte rendu de l'excursion à la Baralière, à Turben et à Broussan; *id.*, p. 1116.

64. Sur la bande d'affaissement de Chibron; *id.*, p. 1132.

65. Compte rendu de la course de Brignoles à Salerne et au défilé de la Bouissière; *id.*, p. 1166.

66. Le massif d'Allauch; *Bull. des services de la Carte géol. de France*, décembre 1891.

1892.

67. Sur les récents progrès de nos connaissances orogéniques; *Revue gén. des Sc. pures et appliquées*, 15 janvier 1892 (article reproduit dans le *Bulletin de la Société belge de Géologie*, décembre 1892).

68. Remarques sur les anomalies magnétiques observées par M. Moureaux; *Comptes rendus somm. Soc. Géol.*, 1er février 1892.

69. Sur la déformation de l'écorce terrestre; *Comptes rendus Ac. Sc.*, 22 février 1892.

70. Sur les poudingues de la Ciotat et les deltas crétacés; *Comptes rendus somm. Soc. Géol.*, 21 mars 1892.

71. Sur la continuité du phénomène de plissement dans le bassin de Paris; *Comptes rendus somm. Soc. Géol.*, p. LIII (1892), p. XXVI (1893) et *Bull. Soc. Géol.*, t. XX, p. 118.

72. Plis de la Sarthe; *Comptes rendus somm. Soc. Géol.*, 16 mai 1892.

73. Sur la formation des vallées; *id.*, 9 juin 1892.

74. Comparaison de la série sénonienne des Corbières avec celle de la Provence (réunion extraordinaire des Corbières); *Bull. Soc. Géol.*, t. XX, p. 520.

75. Les montagnes de l'Écosse; *Revue gén. des Sc. pures et appliquées* 15 décembre 1892 (traduction reproduite dans le *Geol. Magazine*).

76. Raccordement des plis entre la Dent du Midi et les Alpes françaises; *Comptes rendus somm. Soc. Géol.*, 19 décembre 1892.

77. Le Môle et les collines de Faucigny (Haute-Savoie); *Bull. des serv. de la Carte Géol. de France*, décembre 1892.

1893.

78. Sur le raccordement des bassins houillers du nord de la France et du sud de l'Angleterre; *Ann. des Mines,* janvier 1893. (Un abrégé de ce Mémoire a été reproduit dans les *Transactions of the federated institution of Minig Engineers,* Newcastle-Upon-Tyne).

79. Sur la structure du Môle; *Comptes rendus somm. Soc. Géol.,* 6 février 1893.

80. Rapport sur les travaux de M. Kilian (prix Fontannes); *Bull. Soc. Géol.,* t. XXI, p. 97.

81. Sur la bande triasique de Rians et de Barjols; *Comptes rendus somm. Soc. Géol.,* 15 mai 1893.

82. Observation sur les gisements anormaux de gypse; *Comptes rendus somm. Soc. Géol.,* 15 mai 1893.

83. Sur les gypses du Salt Range; *Comptes rendus somm. Soc. Géol.,* 4 décembre 1893.

1894.

84. Sur la structure des Alpes françaises; *Comptes rendus Ac. Sc.,* 22 janvier 1894.

85. Lignes directrices de la Géologie de la France; *Comptes rendus Ac. Sc.,* 29 janvier 1894.

86. Comptes rendus pour la campagne de 1893; *Bull. des serv. de la Carte géol. de la France* (Provence, p. 105, Maurienne et Tarentaise, p. 110).

87. Études dans les Alpes françaises (structure en éventail, massifs amygdaloïdes et métamorphisme); *Comptes rendus somm. Soc. Géol.,* 22 janvier 1894 et *Bull. Soc. Géol.,* t. XXII, p. 69.

88. Sur les phénomènes chimiques qui peuvent amener la transformation du calcaire en gypse; *Comptes rendus somm. Soc. Géol.,* 19 février 1894.

89. Études dans les Alpes françaises (schistes lustrés de la zone centrale); *Comptes rendus somm. Soc. Géol.,* 5 février 1894, et *Bull. Soc. Géol.,* t. XXII, p. 119.

90. Sur un nouveau travail de M. Briart; *Comptes rendus somm. Soc. Géol.,* 5 mars 1894.

91. Sur une Note de M. Lawson; *Comptes rendus somm. Soc. Géol.*, 5 mars 1894.

92. Sur les gisements phosphatés de la craie du Nord; *Comptes rendus somm. Soc. Géol.*, 29 mars 1894.

93. Études sur le bassin houiller du Nord et sur le Boulonnais; *Ann. des Mines*, juillet 1894.

94. Lignes directrices de la Géologie de la France; *Revue gén. des Sc. pures et appliquées*, septembre 1894.

95. Structure des Alpes françaises et récurrence de certains faciès (Conférence au Congrès international de Zurich, septembre 1894).

CARTES GÉOLOGIQUES.

(*Cartes de l'État-Major, au* $\frac{1}{80000}$).

Dans le Jura.....	Feuille de Gray (1880), avec une feuille de coupes.
»	Feuille de Besançon (1881).
»	Feuille de Lons-le-Saunier (1884).
»	Feuille de Pontarlier (1887).
»	Revision partielle de la feuille de Nantua.
En Provence.....	Feuilles de Toulon et de la Tour de Camarat (1886).
»	Feuille de Marseille (1891), avec la collaboration de M. Depéret pour le bassin tertiaire.
Dans les Alpes...	Collaboration aux quatre feuilles de Saint-Jean-de-Maurienne, Bonneval, Tignes et Albertville; les deux premières seulement sont terminées.
» ...	Sur la feuille d'Annecy, massif du Môle.

NOTICE

SUR LES

TRAVAUX SCIENTIFIQUES

DE

M. Marcel BERTRAND.

ÉTUDES RÉGIONALES.

I. — Région du Jura.

J'ai consacré huit années à l'étude du Jura; j'y ai fait entièrement quatre feuilles de la Carte géologique détaillée, celles de Gray, de Besançon, de Lons-le-Saunier et de Pontarlier, et j'ai revisé en partie la feuille de Nantua.

Succession des étages. — Cette succession n'avait guère été étudiée en détail que dans le nord de la chaîne. En prenant pour point de départ les travaux de M. Choffat, j'ai essayé de suivre pas à pas les transformations des couches et d'établir ainsi le passage entre la province du nord et la province méditerranéenne. J'ai pu constater [5] (1) que, pendant la période jurassique, les constructions de Polypiers ont

(1) Les nombres entre crochets indiquent le renvoi aux numéros correspondants de la liste des Mémoires publiés.

reculé progressivement, du bassin de Paris vers le sud, pour se concentrer, à la fin de la période, sur les bords de la mer alpine, qu'elles ont alors entourée et bordée d'une longue rangée de récifs. Sauf pour le gisement de Valfin que j'avais un peu trop rajeuni, ces conclusions ont été confirmées par la Société géologique, que j'ai conduite dans le Jura en 1884 [16, 18 et 19].

J'ai établi également l'âge pliocène des terrains bressans [4].

Structure de la chaîne. Plissements et failles. — La chaîne du Jura offre le type le plus complet des mouvements de plissement simples et réguliers. Dans la haute chaîne, du côté suisse, les terrains ont, comme une masse plastique, obéi sans rupture aux forces de compression. A mesure qu'on descend sur le versant français, les plis se compliquent de failles ; les rides, moins pressées, s'espacent de larges plateaux séparés par des accidents plus ou moins complexes [3 et 9].

Cette différence se rattache à un problème général de l'orogénie : doit-on voir dans le *pli* et dans la *faille* deux phénomènes distincts, correspondant à des mouvements indépendants et à des causes différentes? La faille est-elle une déchirure profonde, traversant toute l'écorce terrestre, ou seulement un glissement superficiel, facilitant l'agencement nouveau des masses mises en mouvement et déformées? Si l'on se borne à tracer l'affleurement de la faille, la connaissance de cette ligne unique de la surface de discontinuité ne permet pas évidemment de répondre à la question. Mais si l'on s'astreint à déterminer en chaque point l'inclinaison de la faille et l'allure des terrains voisins, comme la surface de discontinuité est une surface continue, ces données sont le plus souvent suffisantes pour en reconstituer l'allure en profondeur, et pour en conclure la nature du mouvement d'ensemble auquel elle se rattache. La constatation de la faille n'est plus alors le but, mais le moyen d'aborder un problème plus essentiel et plus caché.

L'idée de faire de la faille *un sujet d'étude*, et non *un objet de constatation*, a été pour moi le progrès le plus important réalisé dans mes méthodes d'observation. Si j'ai rencontré quelques résultats nouveaux, c'est à elle que je le dois.

Dans le Jura, cette étude m'a mené d'abord à reconnaître la relation

ordinaire des failles avec le phénomène de plissement. Sur le bord de la chaîne, aux environs de Besançon et de Salins, j'ai montré l'existence de failles presque horizontales [2]. Les terrains plus anciens ont été poussés et charriés sur les terrains plus récents. Ces mouvements n'ont là qu'une faible amplitude, mais ils appelaient pour la première fois en France l'attention sur un phénomène dont j'ai reconnu depuis la généralité.

Une surface de faille horizontale, ou même inclinée, donne nécessairement naissance, par son intersection avec la surface irrégulière du sol, à un affleurement sinueux; mais toutes les sinuosités des failles ne sont pas dues à cette cause. En descendant plus au sud, j'ai trouvé d'autres exemples qui ne pouvaient recevoir la même explication [10] : ce sont des paquets de terrains plus récents, enfouis au milieu de terrains plus anciens. Là, la surface de séparation est souvent verticale. Il s'agit alors manifestement d'affaissements qui ont comblé un vide souterrain, et qui, sans aucun doute, l'ont comblé par une descente progressive, au fur et à mesure de sa formation. Le rôle général de ces bassins d'affaissement avait déjà été signalé par M. Suess, et mis par lui en opposition avec celui des zones de plissement. Les exemples de la lisière du Jura présentent ce caractère intéressant, qu'au lieu d'être entourés par un réseau périphérique de fractures, ils sont limités comme à l'emporte-pièce par une faille unique, dont l'affleurement dessine une courbe fermée.

II. — Alpes de Glaris.

En étudiant l'important ouvrage de M. Heim sur les Alpes de Glaris et sur le mécanisme de la formation des montagnes, j'ai été frappé de l'analogie que présentaient les coupes de M. Heim avec celles du bassin houiller franco-belge, telles que les a données M. Gosselet. Cette analogie était restée inaperçue, surtout à cause des différences de langage employé, tout d'un côté étant expliqué par des failles et tout de l'autre par des plis ou des étirements.

En suivant le rapprochement dans toutes ses conséquences, on est amené à concevoir la possibilité de grouper autour d'une hypothèse

nouvelle les principales anomalies de la géologie de la Suisse [8] : des Alpes de Glaris aux Alpes de Savoie, les terrains des sommets de la chaîne seraient descendus sur ses versants, formant une *nappe de recouvrement* continue, de plus de 30^{km} de largeur. Si l'on veut parler de plis, c'est l'hypothèse d'un pli unique substituée à celle du double pli de M. Heim, ce pli central formant comme un dais immense au-dessus de ceux de la bordure. La dénudation a ensuite plus ou moins entamé et fait disparaître la nappe de recouvrement : tantôt le substratum, composé de terrains plus récents, est mis au jour par des trouées locales et limitées; tantôt il est entièrement découvert, et l'ancien manteau superposé n'a laissé que des témoins isolés, ou même seulement des blocs épars à la surface du sol [41].

Dix ans plus tard, M. Schardt a été amené de son côté à une hypothèse semblable; on commence seulement aujourd'hui à essayer de la préciser ou de la combattre par des arguments et des observations de détail. Quel qu'en doive être le résultat, l'hypothèse aura été utile en appelant l'attention sur le rôle important et général des déplacements horizontaux, et elle m'a aidé à reconnaître la trace de phénomènes semblables dans une province française où rien ne les laissait soupçonner.

III. — Andalousie.

J'ai fait partie en 1884, sous la direction de M. Fouqué, de la mission envoyée par l'Académie des Sciences en Andalousie, à la suite des tremblements de terre. J'ai étudié particulièrement, avec M. Kilian, les terrains secondaires et tertiaires des provinces de Grenade et de Malaga.

Le trias est représenté par des marnes bariolées, avec intercalations de gypses, de dolomies et d'ophites; nous avons établi l'âge de ce système contesté, sans pouvoir cependant expliquer les anomalies qui, en plusieurs points, comme dans les Pyrénées, le font brusquement apparaître en dehors de sa position normale.

Le jurassique est composé de grandes masses calcaires, qui n'avaient pas encore été subdivisées; nous avons donné, avec fossiles à l'appui, la succession de ses étages, et nous avons montré l'analogie de la faune

avec celle de l'Italie du Sud ; c'est l'indication d'une province faunique spéciale, la *province tyrrhénienne*, qui s'étendait jusqu'au nord de l'Algérie.

A partir du crétacé, qui n'est représenté que par sa base, on suit les progrès du soulèvement de la zone montagneuse. Un premier mouvement est indiqué par la discordance de l'éocène; puis est venue la période de plissement énergique, qui a donné à peu près aux couches leur allure actuelle, avec une élévation moindre de la chaîne. Cette chaîne embrassait d'abord dans un même ensemble l'Andalousie et l'Algérie, et elle est devenue alors une sorte de barrière mobile, qui a ouvert et fermé alternativement la communication de la Méditerranée avec l'Atlantique.

Pendant l'époque du miocène moyen, cette communication s'est établie sur l'emplacement des vallées du Guadalquivir et du Chellif; un nouveau mouvement l'a interrompue, mais pour peu de temps; des vallées profondes se sont creusées que la mer a envahies de nouveau. Un détroit moins large s'est reformé à la même place, a été en partie comblé par les apports torrentiels, s'est transformé en lagunes où l'évaporation a entassé des centaines de mètres de gypse, et enfin, après une période de dépôts lacustres, l'émersion est devenue définitive. La Méditerranée a passé ainsi momentanément à l'état d'une vaste Caspienne, sur les bords de laquelle on ne trouve plus que des dépôts saumâtres. C'est seulement au début du pliocène que l'ouverture du détroit de Gibraltar a inauguré des conditions à peu près semblables aux conditions actuelles.

L'histoire des mouvements du sol en Andalousie offre donc un intérêt spécial, car elle se rattache à toute l'histoire de la Méditerranée et en donne l'explication.

La cause directe des tremblements de terre demeure inconnue. Quoique, en dehors des ébranlements et glissements superficiels, ils n'aient produit aucune déformation apparente, on doit y voir la suite et comme un dernier écho de cette mobilité exceptionnelle du sol dont nous avons retrouvé les traces dans toute la période tertiaire.

IV. — Provence.

J'ai commencé en 1881 l'étude géologique de la Provence; je l'ai poursuivie, conjointement avec l'étude du Jura, jusqu'en 1885, puis jusqu'au moment où, en 1889, j'ai commencé mes recherches dans les Alpes. J'y ai tracé, pour la carte géologique détaillée, les contours des feuilles de Toulon et de Marseille, et j'ai continué l'examen des problèmes relatifs à la structure du pays sur une partie des feuilles d'Aix et de Draguignan.

La Provence est un pays de plissements. — La Provence, en désignant ainsi la région naturelle qui s'étend entre la Durance, le Verdon et la mer, n'avait guère été étudiée qu'au point de vue de la composition des terrains qui s'y rencontrent; la structure en était presque complètement inconnue. Quelques accidents avaient été signalés par Coquand, quelques plis décrits par M. Collot dans les environs d'Aix; mais, dans son ensemble, la structure du pays semblait plus se rapprocher de celle des pays de plaines que des pays de montagnes. J'ai montré que, malgré les apparences contraires, la Provence était, en réalité, un morceau de la chaîne alpine, qu'elle avait été soumise aux mêmes efforts de compression, et qu'elle formait un trait d'union entre les Alpes et les Pyrénées.

Ce premier point était difficile à établir à cause de la grandeur des actions de dénudation qui ont presque partout effacé les traits caractéristiques de l'allure des plissements alpins. Les reploiements des couches qui s'étalent dans les hautes parois des Alpes sont ici rarement visibles, et il faut presque partout les reconstruire par induction. C'est la chaîne de la Sainte-Beaume [11] qui m'a fourni d'abord des preuves, par les renversements, les répétitions et surtout les étirements des étages successifs. Le phénomène de plissement, tel que nous le comprenons, ne pouvant être dû qu'à une cause d'ensemble, je n'hésitai pas à étendre la conclusion à toute la région.

Plis couchés, charriages horizontaux. — Le second point, c'est que

les plis de la Provence sont des *plis couchés*, des plis où les strates, bien que repliées sur elles-mêmes, sont restées ou redevenues horizontales, des plis, par conséquent, dans la formation desquels les déplacements horizontaux ont joué le principal rôle. C'est auprès du Beausset que j'ai pu en trouver la preuve [28 et 33].

Au Beausset, vers le centre d'un bassin crétacé, dont les couches s'étalent horizontalement sur plusieurs kilomètres, on voit surgir un plateau formé de terrains plus anciens, surtout triasiques, également voisins de l'horizontalité. Ces terrains horizontaux ne se sont certainement pas fait jour à travers les terrains plus récents dont ils auraient dérangé l'allure ; il semble donc évident qu'ils formaient déjà saillie dans les mers crétacées dont les sédiments ont dû se déposer à leurs pieds. Mais, si l'on examine avec soin les contacts, on voit que l'îlot triasique a son soubassement formé, non pas par les couches les plus anciennes, mais par les couches les plus récentes de la série, et de même, au-dessus des bancs les plus récents du système crétacé, on trouve un couronnement formé par des couches plus anciennes qui devraient être enfouies à 500^m ou 1000^m de profondeur. Ces bandes renversées n'ont qu'une faible épaisseur et ne se trouvent qu'auprès de la ligne de contact des deux systèmes. J'ai prouvé que leur position ne pouvait s'expliquer que si le trias était superposé au crétacé ; il est vrai qu'il faut pour cela faire venir ce trias de plus de 6^{km}, qu'il faut le faire passer par-dessus une montagne haute de plusieurs centaines de mètres ; mais j'ai retrouvé les jalons du chemin parcouru, j'ai reconstitué sur toute sa longueur le pli primitif, et j'ai montré que la conclusion était inévitable.

M. Vasseur, en reprenant cette étude, a cru trouver des objections ; les fouilles qu'il a fait faire l'ont ramené à ma manière de voir [59]. Dans la petite exploitation voisine de Fontanieu, les puits ouverts dans le trias ont rencontré plus bas le crétacé, et les galeries de mines ont traversé, sans rencontrer le trias, une colline recouverte d'un chapeau triasique. La Société géologique a vérifié les faits en 1891 [60 et 62]. Le résultat est aujourd'hui acquis sans réserve.

« Sans doute, disais-je dans ma première Note sur cette question [28], on a peine à concevoir ces grands plis couchés qui se déroulent, s'allongent, forment de larges traînées au-dessus des couches plus

récentes et simulent de véritables *coulées* de terrains sédimentaires, rappelant presque les coulées du basalte...; mais les difficultés théoriques ne peuvent prévaloir contre des faits d'observation : les travaux de mines en Belgique, les grandes parois rocheuses des Alpes suisses, la concordance des coupes au Beausset nous fournissent des preuves distinctes, indépendantes et irréfutables. S'il est vrai qu'on puisse encore discuter le mécanisme de ces phénomènes grandioses de recouvrement, on n'en peut mettre en doute ni l'existence ni même la généralité..., et dès maintenant on ne saurait se refuser à y voir une phase normale des grands mouvements orogéniques. » Les découvertes faites depuis dans les Pyrénées, en Suède et en Norvège, dans les Montagnes Rocheuses et dans les Appalaches, dans l'Himalaya, ont donné raison à cette première généralisation.

La Provence elle-même fournit de nouveaux exemples : en même temps que le pli du Beausset, celui de la Sainte-Beaume [40], ceux de Brignoles, de Salerne et d'Ampus [43], se sont déversés, par un mécanisme semblable, sur les bassins qui les séparent, et les ont recouverts de masses charriées horizontalement. En deux points, j'ai pu retrouver les charnières mêmes des plis, et à Salerne j'ai montré l'indépendance des mouvements secondaires qui ont affecté, soit la nappe charriée, soit les terrains en place qu'elle recouvre [65].

Enfin, j'ai constaté avec M. Zürcher [56], et il a montré, plus tard, avec de plus grands détails, que les terrains cristallins des Maures avaient de même été poussés et charriés au-dessus des terrains de bordure, permiens et triasiques.

Sinuosité des plis; sens des mouvements. — Les grands plis de la Provence ne se sont pas propagés en ligne droite; leurs lignes directrices sont sinueuses. C'est, avec la profondeur des dénudations, une nouvelle difficulté apportée à leur étude. Les plus grands déplacements horizontaux ont eu lieu vers le nord, mais quelques-uns sont dirigés en sens inverse, et atteignent encore 2^{km}. Ces changements de sens semblent se produire quand un pli, par une double inflexion, arrive à 180° de sa direction primitive, ce qui permet d'énoncer la règle suivante [40] : *Les plis successifs, quelles que soient les sinuosités et les enchevêtrements de leurs parcours, se renversent toujours vers celui qui leur*

fait suite plus au nord. On voit bien à cette règle provisoire une certaine raison de *continuité*, mais il paraît difficile d'en préciser la cause, tant que les causes mêmes de la sinuosité des plis resteront inexpliquées.

J'ai d'ailleurs retrouvé, plus tard, la même loi pour les sinuosités des plis alpins [85].

Plis transversaux; mouvements postérieurs. — La Provence présente une autre bizarrerie : tous les plis sont interrompus par une grande bande transversale de trias, qui tantôt les coupe normalement, tantôt s'infléchit parallèlement à leur direction, et qui a marqué, depuis l'époque oligocène, la place du cours de l'Huveaune [79]. C'est tout le long de cette bande, elle-même énergiquement plissée, que se rencontrent les plus grandes irrégularités : étirements et suppressions de couches, arrêt ou déviation brusque des plis. Près d'Allauch, au nord de Marseille [66], la ligne directrice d'un des plis semble même s'arrondir en boucle fermée, et elle isole ainsi un massif montagneux, dont les terrains plus récents s'enfoncent de toutes parts sous le trias qui leur forme une ceinture étroite et continue.

J'ai discuté en détail ces phénomènes spéciaux, et leur rattachement au régime général de la région. Tout n'est pas encore expliqué; mais les choses se passent comme si, au réseau simple des plis tel qu'il serait résulté d'une compression latérale, était venue s'adjoindre une ligne étrangère, correspondant à une zone de faiblesse déterminée par des mouvements antérieurs. Le long de cette zone, il a suffi d'une faible composante des actions mises en jeu pour déterminer les plissements, qui, par raison de continuité, avec plus ou moins de gêne et de torsion, ont dû se raccorder avec le réseau principal.

Si l'on ajoute à cela l'analyse des actions postérieures qui, se continuant dans la même direction, ont ondulé les nappes de recouvrement [62], et, de plus, le rôle assez local des bassins d'affaissement qui s'échelonnent de Marseille aux sources du Gapeau [64], je puis dire que toutes les complications secondaires qui pouvaient obscurcir l'histoire de la Provence se trouvent maintenant, sinon élucidées, du moins partout méthodiquement groupées et mises à part, de manière à laisser en complète évidence le phénomène principal, celui

qui donne à la région son caractère dominant et son individualité, celui des plis couchés et des grands chevauchements horizontaux. En dépit des difficultés multiples qui en font peut-être le pays le plus compliqué qu'on ait jamais décrit, la Provence peut maintenant devenir, pour ces plis couchés et déroulés, une région aussi complètement typique que le Jura pour les plis droits et réguliers.

Rôle et mécanisme des déplacements horizontaux [52]. — A la suite de l'étude de la Provence, j'ai traité cette question générale dans un Mémoire, auquel l'Académie des Sciences a décerné le prix Vaillant, et qui n'a pas encore été publié, parce que certaines observations me manquaient encore pour une description complète de la région. Je détache ici quelques-unes des conclusions reproduites dans le rapport de M. Daubrée.

L'action de plissement est partout le fait primordial et nécessaire : les exemples des Alpes suisses, les amorces des charnières que j'ai signalées en Provence, celles que M. Briart a mises en évidence dans le bassin houiller belge, celles que MM. Kilian et Haug ont trouvées dans l'Ubaye, suffisent à assurer cette première conclusion.

Le point de départ du phénomène est donc partout un paquet de couches amenées en saillie et repliées sur elles-mêmes. Quand ce paquet est poussé en avant, les couches renversées qui forment la base, conservant toujours le même volume, s'étalent de plus en plus. Elles restent visibles aux deux extrémités, près des charnières synclinale et anticlinale; dans l'intervalle, elles s'étirent et disparaissent, comme une membrane élastique, amincie et même partiellement rompue en son milieu.

Dans tout l'ensemble du paquet, les surfaces de stratification sont des surfaces de glissement facile, parallèles aux forces mises en jeu. Les déplacements relatifs ont donc tendance à se répartir indifféremment sur toutes ces surfaces; au lieu de produire quelques surfaces de discontinuité nettement tranchées, ils se traduisent par une série d'étirements et de suppressions de couches. Le résultat en est un véritable *réarrangement des couches*, qui reprennent, aux épaisseurs près, l'apparence de dépôts restés en place.

Dans les exemples observés, les choses se passent comme si le

pied du pli, ou charnière synclinale, était resté immobile. S'il n'en était pas ainsi, on n'observerait à la surface qu'un *déplacement relatif,* souvent très inférieur au déplacement total. Il est probable que les sinuosités des plis et les grands *décrochements* proviennent d'une répartition inégale des déplacements horizontaux à plus ou moins grande distance de la surface. Les nombres observés à la surface sont donc des *minima,* et pourtant ils atteignent avec certitude 15^{km}; l'hypothèse que j'ai indiquée pour la Suisse les porterait à 50^{km}, et M. Torneböhm a pu parler de 100^{km} pour la Suède. Ces énormes déplacements horizontaux se retrouvent dans toutes les grandes chaînes, quel que soit leur âge, et ils apportent un argument définitif en faveur de la théorie du refroidissement et de la contraction du globe terrestre.

V. — Alpes de Savoie.

Massif du Môle (Haute-Savoie) [75]. — La montagne du Môle est remarquable par la brusque inflexion que subissent à ses pieds les plis du Faucigny et du Genevois, en arrivant à la vallée de l'Arve. Une inflexion semblable se retrouve le long de plusieurs grandes vallées de la Suisse, le Rhône, l'Aar, le Rhin, et elle est accompagnée de brusques modifications dans la série sédimentaire sur les deux rives.

J'ai rapproché ces deux phénomènes en leur assignant pour cause commune la production d'une ligne d'affaissement transversal; cet affaissement, sur les bords de l'Arve, a eu lieu aux débuts de l'époquo crétacée. Le bord en a constitué une ligne de faiblesse ou de moindre résistance qui, comme telle, est venue s'ajouter aux autres lignes du réseau déjà ébauché. Il s'est formé ainsi une arête de rebroussement qui, après le soulèvement de la chaîne, est restée la dernière ligne suivant laquelle se sont fait sentir les mouvements du sol. On s'explique ainsi la formation de la vallée, la démarcation qu'elle établit entre deux régions d'aspect différent et la disposition si remarquable des grands lacs à la limite de la zone montagneuse et de la plaine mollassique.

Maurienne et Tarentaise. — Dans cette région plus étendue, j'ai

étudié plus spécialement la zone frontière entre le tunnel du mont Cenis et le mont Blanc. Les recherches simultanées de M. Termier dans la Vanoise, de M. Kilian dans le Briançonnais et dans l'Ubaye, nous ont permis d'établir en détail, malgré l'absence de fossiles, l'échelle stratigraphique des terrains. Elles nous ont montré, en outre, que les failles, contrairement à l'opinion de Lory, sont partout subordonnées aux plis, qu'elles sont partout parallèles aux strates et qu'elles sont seulement une exagération locale des phénomènes très généraux d'étirement sur les flancs des plis.

Age des schistes lustrés. — Une erreur dans nos premières conclusions a longtemps retardé toute possibilité d'une vue d'ensemble. Les schistes lustrés, qui occupent avec un pendage uniforme une grande partie de la région, avaient été attribués par Lory au trias, et par M. Zaccagna au paléozoïque. Nous nous étions d'abord laissé convaincre, M. Potier, M. Kilian et moi, par les arguments de nos confrères italiens, dont nous avions cru trouver de nouvelles confirmations. Peu à peu, cependant, l'étude de détail m'a révélé des contradictions et, à mesure que la structure d'ensemble s'éclaircissait, le rapprochement des différentes coupes m'a fourni des preuves incontestables en faveur de l'opinion de Lory. Une partie même des schistes, sans qu'il y ait jusqu'ici de démarcation possible, est probablement liasique [87].

Les conséquences qui se dégagent alors ont une importance générale pour l'histoire de la chaîne [85].

Structure en éventail. — Dans les Alpes de Savoie, les plis du versant ouest sont couchés vers la France, les plis du versant est sont couchés vers l'Italie. Entre les deux, la bande bien connue des terrains houillers forme le centre de l'éventail. Alph. Favre avait depuis longtemps signalé dans la bande houillère, au moins auprès de Modane, cette structure en éventail. Lory avait bien vu aussi que cette zone formait le véritable centre du soulèvement alpin; mais la conséquence générale était restée inaperçue, d'une part, à cause de la trop grande importance attachée à quelques exceptions locales, d'autre part, à cause du peu d'attention accordée aux plis du versant oriental, dont l'existence même était contestée.

Cette conséquence ne s'applique pas seulement à la Maurienne et à la Tarentaise. Les apparences changent rapidement quand on s'éloigne, soit vers les Alpes cottiennes, soit vers les Alpes suisses : au sud, les terrains houillers disparaissent; la bande centrale, sous laquelle plongent en sens inverse les deux systèmes de plis, est occupée par les terrains les plus récents de la chaîne; au nord-est, au contraire, les terrains houillers ne forment plus qu'un des bords de l'éventail; la zone élargie embrasse tout le massif du mont Rose et comprend au moins une partie des schistes cristallins désignés depuis longtemps sous le nom de *Massif central.* Mais, que la zone soit élevée ou affaissée, dilatée ou rétrécie, elle n'en sépare pas moins deux systèmes de plis, couchés en sens inverse; elle n'en forme pas moins le centre du même grand éventail.

Il existerait, il est vrai, une exception importante, du Chablais à Glaris, si l'hypothèse indiquée plus haut, à propos du double pli de Glaris, ne se trouve pas confirmée. Dans le cas contraire, les exceptions restent peu nombreuses et accidentelles, réduites à certains massifs isolés et saillants qui semblent tous rentrer dans une catégorie spéciale, celle des massifs amygdaloïdes.

Structure amygdaloïde. — J'ai montré, en effet, que les plis de cette partie des Alpes, tout en suivant dans leur ensemble la direction de la chaîne, s'ouvrent de place en place autour de lentilles elliptiques, accidentées elles-mêmes de nouveaux plis, qui sont limités à la lentille et ne se prolongent pas au delà. Le massif de la Vanoise se dresse ainsi au milieu d'une cuvette élargie de trias supérieur, celui du mont Blanc au milieu d'une cuvette de lias. Le réseau des plis présente de cette manière une série de *nœuds* et de *ventres;* on peut comparer cette structure à celle d'un gneiss amygdaloïde dans lequel les feuillets s'infléchissent autour de gros noyaux de quartz et de feldspath.

J'ai indiqué depuis [91] que la structure amygdaloïde, signalée là pour la première fois, est en réalité un fait très général, dont j'ai proposé l'explication suivante : l'histoire des différentes chaînes nous montre d'abord la formation de larges plis qui s'accentuent progressivement; la continuation des actions de plissement produit une tendance toujours nouvelle des masses comprimées en profondeur à venir cher-

cher au dehors la place qui leur manque à l'intérieur. Ces masses s'élèvent d'abord là *où la voie est tracée,* c'est-à-dire sur l'emplacement des plis déjà ébauchés. Puis, quand, par suite soit de l'obstruction qu'elles amènent en s'entassant, soit de la compression plus grande, ces sortes de débouchés deviennent insuffisants, elles s'élèvent partout *où la voie est libre,* c'est-à-dire aux points où la surface n'a pas encore subi les influences de compression et de tassement. Ces points sont évidemment les milieux des anciennes cuvettes synclinales, où les couches sont restées horizontales sur une assez grande largeur; les pressions forcent alors des plis nouveaux à se dresser au milieu de ces synclinaux et à les subdiviser en cuvettes plus nombreuses. Mais là où, au lieu d'un large synclinal, il existait un synclinal localement élargi, les conditions de résistance étaient les mêmes; les matières profondes se sont là élevées de la même manière et, d'après la forme de l'espace qui leur était offert, elles ont créé, au lieu d'une voûte allongée, une saillie limitée en forme de dôme ellipsoïdal. La création des massifs amygdaloïdes serait ainsi un phénomène du même ordre et dû aux mêmes causes que la subdivision progressive des plis. Il serait, non la cause, mais la conséquence de leur écartement intermittent et de la disposition des réseaux en nœuds et en ventres successifs. Cette dispotion très générale pourrait peut-être elle-même se rattacher à une des conditions imposées à la déformation du globe, celle de conserver son ellipticité.

On conçoit qu'un massif ainsi mis en saillie, et non soutenu, ait tendance, par la seule action de la pesanteur, à pencher du côté du vide et à s'incliner sur ses bords. Il en résultera, pour une partie ou pour l'ensemble, une structure en éventail, en général faiblement accentuée, qui constituera une exception à la règle de l'inclinaison uniforme des plis d'un même versant. Mais ces exceptions, ainsi limitées et facilement explicables, n'infirment évidemment en rien la portée de la loi.

Métamorphisme. — M. Zaccagna a montré que, dans une partie des Alpes, le métamorphisme a transformé le Permien en schistes très cristallins. M. Termier a établi le même résultat dans la Vanoise, et a indiqué que dans ce massif *le métamorphisme va en croissant de l'ouest vers l'est.* Je suis arrivé de même à rattacher avec certitude au Permo-

houiller les anciens gneiss chloriteux et micaschistes du mont Pourri, du petit mont Cenis et du val Grisanche; une partie des mêmes arguments s'applique aux gneiss œillés du Grand Paradis, à ceux qu'on a désignés sous le nom de *gneiss central*. Il en résulte une conséquence importante : dans la zone métamorphique des Alpes, qui d'ailleurs resterait à délimiter, les gneiss sont plus récents que ceux des chaînes plus anciennes : le faciès cristallin (avec quartz et feldspath) qu'on a coutume de rapporter à l'archéen, à la phase *azoïque* ou *agnotozoïque* de l'histoire du globe, monterait là jusqu'au permo-houiller, et le faciès de schistes micacés et de phyllades, qui le surmonte normalement et qu'on englobe souvent sous le nom de *précambrien*, monterait jusqu'au Trias.

Cette interprétation fait disparaître une des anomalies de la stratigraphie alpine, les énormes changements d'épaisseur et les brusques lacunes que Lory expliquait par le jeu intermittent de failles verticales.

VI. — Bassin houiller du Nord.

J'ai été amené par mes études théoriques à discuter les prolongations possibles du bassin houiller franco-belge du côté de la mer et de l'Angleterre, et à reprendre ainsi l'examen de la structure de la partie connue du bassin [76 et 91]. De la comparaison des différentes coupes, j'ai conclu que la faille désignée dans le nord sous le nom de *cran de retour* ne pouvait pas être une faille d'affaissement ni avoir la signification qu'on lui a prêtée jusqu'ici. Tous les accidents du bassin se rattachent alors au grand phénomène de charriage, semblable à ceux que j'ai décrits en Provence; une même coupe, dans laquelle on arrête à différents niveaux la surface de dénudation, c'est-à-dire la surface actuelle du sol, peut reproduire toutes les apparences observées de Liége au Boulonnais, et l'on peut en conclure que, *dans le Nord, les terrains houillers se continuent en profondeur à plusieurs kilomètres au sud de la limite admise*.

GÉOLOGIE GÉNÉRALE.

I. — Succession des chaînes de montagnes. Récurrences.

M. Suess a montré que les grandes chaînes qui bordent la dépression méditerranéenne, les Alpes, le Caucase, l'Himalaya, ne forment en réalité qu'une même zone de plissements, et qu'elles se rattachent les unes aux autres par la continuité des lignes de plis et par celle des zones de sédimentation. Il a montré ensuite qu'une méthode semblable permettait, malgré les lacunes des observations, de définir une chaîne plus ancienne, qui, s'étendant du sud de l'Irlande à la Bohême, se retrouve en Asie dans le Thian Chan, et une troisième, plus ancienne encore, allant de l'Écosse à la Scandinavie. C'est là le point de départ des idées nouvelles, que j'ai cherché à développer, tant dans mon cours de l'École des Mines que dans mes diverses publications.

Zones circumpolaires. — J'ai établi d'abord [25] l'importance et la généralité de cet échelonnement des phénomènes du nord vers le sud, en montrant que l'histoire de l'Amérique du Nord, malgré les différences apparentes de structure et de direction, se rattache à un même plan d'ensemble que celle de l'Europe. Le trait essentiel est l'existence très ancienne d'un continent polaire; sur les bords de ce continent, une première zone de plissements n'est plus reconnaissable que par quelques témoins espacés : c'est la *chaîne huronienne,* antérieure aux premiers organismes connus; puis les trois autres chaînes, en retrait l'une sur l'autre, sont venues s'ajouter par poussées successives sur les bords du continent primitif. La continuité entre les plissements de l'Europe et ceux de l'Amérique ne peut être qu'une hypothèse, puisque la mer les sépare; il est même probable que pour une partie d'entre eux elle n'a jamais existé. Mais la *correspondance* d'un bord à l'autre

de l'Atlantique est établie par l'analogie des positions relatives, de l'âge des mouvements et des terrains qu'ils englobent. Malgré les larges irrégularités de leurs contours, les quatre chaînes témoignent d'une ordonnance générale des phénomènes de déformation autour du pôle; continues ou non, elles déterminent quatre zones circumpolaires, et constituent les quatre grands chapitres de l'histoire du globe.

Cette disposition prendrait une plus grande valeur théorique [67], si on la retrouvait symétriquement dans l'autre hémisphère. Malheureusement la grande extension des mers met de ce côté obstacle à tout progrès sérieux de nos connaissances. Mais, telle qu'elle est connue, elle suffit, malgré l'absence manifeste de tout arrangement géométrique, à appeler l'idée d'un lien avec la rotation et l'aplatissement du globe.

L'histoire des mouvements du sol, celle des phénomènes éruptifs et celle des phénomènes sédimentaires, se groupent naturellement autour des quatre chaînes ainsi définies. Les uns et les autres, malgré les différences propres à chaque époque, se reproduisent périodiquement avec des traits semblables qui constituent de véritables récurrences.

Histoire des mouvements du sol. — A chaque chaîne correspond une période de plissements qui, pendant de longues époques, s'exercent dans le même sens et passent par les mêmes phases. Pendant cette période, les autres points ne restent pas immobiles, mais la chaîne en formation constitue la zone de plus grande mobilité de l'écorce.

Le premier terme de chaque période est, comme on le sait depuis longtemps, l'établissement d'une large cuvette (*géosynclinal*), dont le fond s'enfonce graduellement et où s'accumulent les sédiments. Puis des rides successives subdivisent le fond de la cuvette; vers la fin de la période, par une sorte de brusque aboutissement des efforts longtemps mis en jeu, les rides se pressent plus nombreuses et s'entassent plus rapidement; alors se forment les grands plis couchés. En avant de chaque chaîne, on trouve les mêmes déplacements horizontaux vers le nord; chaque vague a *déferlé* sur l'obstacle qui l'arrêtait.

Le mécanisme du plissement semble toujours être resté le même. Pourtant [74], dans les chaînes plus anciennes, les jeux relatifs ne se sont pas faits, aussi uniformément que dans les Alpes, par des glisse-

ments parallèles aux couches. Les vraies failles, ou surfaces de glissement obliques aux couches, sont déjà plus fréquentes dans le bassin houiller du Nord, et elles abondent en Écosse. J'ai indiqué, en me fondant sur les expériences de M. Cadell, qu'on pouvait mettre ce fait en rapport avec l'épaisseur de l'écorce englobée dans les plissements, et par conséquent avec la théorie du refroidissement.

Phénomènes éruptifs [38]. — Chaque zone montagneuse a son cortège de roches éruptives. En France, on peut surtout étudier les éruptions de l'époque carbonifère, dont l'ordre a été établi par M. Michel-Lévy. On avait tendance à croire que cet ordre se retrouvait partout le même, avec une récurrence dans la période tertiaire, et qu'il définissait une relation nécessaire entre l'âge et la structure d'une roche. J'ai montré qu'il fallait admettre autant de récurrences que de chaînes distinctes : sur l'emplacement de chaque chaîne, le granite s'élève en profondeur, refondant et traversant des couches d'autant plus récentes que la chaîne est moins ancienne. Après la période d'ascension du granite vient celle des phénomènes éruptifs : les roches acides alternent d'abord avec les roches basiques, qui peu à peu dominent seules, et ne sortent plus enfin que par un petit nombre d'évents séparés.

Cette succession de phénomènes semble favorable à l'hypothèse de la formation sous chaque chaîne, par le jeu même des plissements, de grands lacs (laccolites) ou réservoirs de matière fondue, susceptibles d'alimenter toute une période d'éruptions. On peut suivre pour chacun d'eux les mêmes phases d'évolution chimique, de morcellement et d'extinction. Nous serions aujourd'hui dans la phase d'extinction du laccolite alpin.

Plusieurs séries de roches échappent, il est vrai, à ce groupement : ce sont d'abord [85] les roches basiques qui accompagnent le premier remplissage des géosynclinaux (orthophyres du Culm, *pietre verde* des Alpes, serpentines et euphotides du flysch); ce sont aussi les traînées volcaniques de l'Atlantique et de l'océan Indien ; ces dernières ne se relient à aucun plissement connu et semblent seulement en rapport avec les bords des grandes dépressions océaniques.

Phénomènes sédimentaires [93]. — La récurrence des phénomènes sédimentaires ne se trouve naturellement que dans les dépôts même

de la zone de plissement, formés sous l'influence directe de la mobilité exceptionnelle du sol. On connaît depuis longtemps la récurrence du terme extrême, celui des dépôts torrentiels qui s'accumulent sur le bord de la chaîne déjà construite, et qui ont produit, avec des faciès presque identiques, les *grès rouges précambriens* du Lac supérieur et de l'Écosse, les *grès rouges dévoniens* du nord de l'Europe, les *grès rouges permiens* de l'Europe centrale, et les poudingues mollassiques des Alpes. J'ai en outre signalé [25] une autre analogie, suggérée par M. Potier, celle du flysch alpin et du terrain houiller. Aujourd'hui, à la suite de mes études sur les Alpes, je crois qu'on peut aller plus loin et dégager un troisième terme de récurrence, qui, comme les deux premiers, se lie à une phase déterminée du soulèvement de la chaîne.

Ce terme nouveau aurait pour type les schistes lustrés ou *flysch schisteux* des Alpes. Il comprend les dépôts fins, accumulés en série uniforme et puissante, qui forment le remplissage de la première cuvette établie sur le futur emplacement de la chaîne; ce sont des schistes sans fossiles, sauf quelques bancs à Radiolaires ou à empreintes végétales, entremêlés de grandes masses de roches vertes, et passant latéralement, sur les bords de la cuvette, à des calcaires fossilifères. Au *flysch schisteux* des Alpes, comprenant le Trias et le Jurassique, correspondraient le Culm dans la chaîne houillère et les schistes d'Hudson (silurien inférieur) dans les Montagnes Vertes.

Quand la première cuvette se subdivise et que la chaîne centrale est émergée, dans les cuvettes de bordure s'entassent des sédiments plus grossiers, formant également des masses puissantes presque sans fossiles (algues et végétaux terrestres). C'est, dans les Alpes, le *flysch* proprement dit ou *flysch grossier* (crétacé et éocène), auquel on peut comparer le terrain houiller ainsi que le silurien supérieur du sud de l'Écosse et de Drontheim. Enfin, quand la chaîne principale a surgi, s'entasse sur ses bords la série déjà mentionnée des grès rouges, ne renfermant guère comme fossiles que des poissons ou des végétaux terrestres.

Ainsi chaque chaîne a son flysch schisteux; chaque chaîne a son flysch grossier; chaque chaîne a ses grès rouges, et ces trois types, quatre fois répétés, embrassent toute l'échelle des terrains sédimen-

taires. De plus, dans chaque chaîne, les terrains immédiatement inférieurs au *flysch schisteux* sont partiellement transformés en gneiss; le granite s'élève jusque dans leur voisinage et monte localement, par pointements isolés, jusque dans le flysch schisteux, c'est-à-dire jusqu'au silurien dans le nord, jusqu'au culm dans le centre de l'Europe et jusqu'au trias dans les Alpes.

Si l'on étendait ces conclusions à une *chaîne future*, le granite y monterait jusqu'au crétacé, et une partie du tertiaire y serait transformée en gneiss. Les faits que M. Lawson vient de signaler tout le long du Pacifique, dans les chaînes côtières de l'Amérique du Nord et de l'Amérique du Sud, pourraient être considérés comme un prélude de cette nouvelle récurrence; le granite, rongeant les terrains par la base, est *déjà* monté jusqu'au jurassique, et on a signalé des gneiss crétacés. D'autre part [92], les récentes observations faites dans l'Alaska et aux Barbades montrent qu'il y a là une zone exceptionnelle de mobilité de l'écorce, pour laquelle il faut admettre *dans l'époque quaternaire* des déplacements verticaux de plus de 2000^{m}. On serait donc amené à voir là l'emplacement d'*une cinquième chaîne en préparation*, et sa position sur les bords du Pacifique serait bien d'accord avec la loi générale du recul progressif vers la dépression médiane qui prolonge la Méditerranée et forme, au voisinage de l'équateur, une ceinture presque continue de mers autour du globe.

Sans doute il reste dans ces généralisations une part inévitable d'hypothèse. Elles groupent du moins une partie des faits connus autour d'une idée simple, et elles montrent la possibilité d'obtenir une vue d'ensemble sur l'histoire géologique du globe.

Dans mes dernières études j'ai cherché le moyen de serrer de plus près le problème de la déformation de l'écorce terrestre.

II. — Lois des déformations de l'écorce terrestre.

Le trait capital des déformations de l'écorce est le soulèvement des chaînes de montagnes, mais il n'est pas le seul : aucune région ne reste complètement immobile, et ces mouvements moindres méritent aussi une étude attentive.

Les ondulations de la craie dans le bassin de Paris ont été depuis longtemps l'objet de nombreuses recherches. En 1891, M. G. Dollfus a réuni et complété co que l'on savait sur la question; la carte d'ensemble qu'il a publiée a mis en évidence une frappante ressemblance d'allures avec les régions plissées, et en même temps une remarquable correspondance de direction avec les plis anciens des provinces voisines, telles que la Bretagne et l'Ardenne.

Les ondulations moins accentuées résultent d'ailleurs, comme les plis des montagnes, soit d'un mouvement lent et continu, soit de la superposition de plusieurs mouvements distincts. J'ai montré [71] qu'on pouvait isoler et étudier à part certaines phases de ces mouvements, et j'ai trouvé que ces composantes du déplacement total se superposent exactement. De même [76], au-dessus du bassin houiller du Nord, les ondulations de la surface des terrains primaires reproduisent fidèlement l'emplacement et la direction des plis anciens. L'application des mêmes principes conduisait à étendre l'étude aux fonds marins; là encore j'ai trouvé que les ondulations de ces fonds continuent les directions des plis de la côte. Ces exemples nouveaux, joints aux coïncidences signalées depuis longtemps en Europe et en Amérique, mènent à la conclusion que *les plis se reproduisent toujours aux mêmes places*.

L'étude des différentes surfaces examinées montre de plus qu'aux ondulations principales s'ajoute un second système, en général moins marqué, formé de lignes perpendiculaires. La loi devient alors la suivante : *Le réseau de déformation reste fixe et se compose d'un double système de lignes orthogonales*. Les unes, comme le montre l'étude des zones de montagnes, entourent grossièrement le pôle et forment uu système de *parallèles;* les autres forment un système conjugué de *méridiens*. Ces méridiens et ces parallèles n'ont rien de géométrique dans leur allure; ils oscillent irrégulièrement autour de leur position moyenne, en dessinant la série de *nœuds* et de *ventres* dont j'ai parlé à propos des massifs amygdaloïdes. C'est dans les parties renflées que s'élèvent souvent les massifs granitiques et que se forment les *dômes ellipsoïdaux* soumis à des mouvements alternatifs de soulèvement et d'affaissement.

Théoriquement la règle énoncée s'explique par une décomposition

très naturelle des efforts mis en jeu; il est peu probable, en raison même de la déformation, que ces efforts agissent toujours dans le même sens; mais ils se décomposent suivant les mêmes lignes. Les mouvements déjà commencés déterminent une direction de moindre résistance, suivant laquelle agit la composante principale. La seconde composante donne naissance à une ride transversale. Si les forces sont assez grandes pour effacer en partie le rôle des résistances, on peut s'attendre à des exceptions; M. Termier en a signalé, en effet, dans les parties des Alpes où deux séries de mouvements énergiques se sont superposées.

Je n'ai encore publié la continuation de mes recherches que pour la France [83 et 92]; sur une carte au millionième, j'ai tracé les principaux plis connus, chacun d'eux étant déterminé directement et indépendamment des plis voisins. J'ai constaté que, quel que soit leur âge, et malgré les irrégularités apparentes, ils s'ordonnent en un réseau unique dont les différents traits viennent se raccorder sans effort et dessinent bien un double système de lignes orthogonales.

Une vérification importante résulte de l'étude des zones de sédimentation : toute épaisse accumulation de dépôts suppose un affaissement corrélatif, la formation d'une cuvette et par conséquent d'une ride de l'écorce. Ces zones doivent donc, elles aussi, s'allonger suivant les lignes du réseau. C'est ce qui arrive en effet, mais avec cette circonstance intéressante que ces lignes plus anciennes indiquent un *réseau simplifié* : ainsi, dans la période paléozoïque, la ligne des Alpes suisses, au lieu de se recourber le long de la frontière française, se prolongeait par le pied des Cévennes et par la montagne Noire; celle des Apennins se continuait par la Provence et par les Pyrénées. Plus tard, la ligne perpendiculaire des Alpes françaises s'est accentuée, et en se soudant aux Alpes suisses, les a reliées aux Apennins; plus tard encore, ces mêmes lignes se sont déviées vers les Pyrénées. Ainsi les grandes sinuosités des chaînes s'expliquent en partie par les déformations du réseau; ces déformations semblent se produire dans les périodes où l'équilibre est le plus profondément rompu, au moment du soulèvement le plus énergique d'une chaîne. Elles n'ajoutent pas d'ailleurs de lignes nouvelles, mais déterminent seulement les zones de plissement à épouser alternativement, en traits brisés, des portions

de lignes appartenant aux deux systèmes orthogonaux. La complication croissante du réseau n'est qu'apparente; elle en respecte le dessin primitif.

C'est ainsi qu'entre la double sinuosité des Alpes cottiennes et des Alpes maritimes, les plis de la Provence se sont trouvés écrasés dans une sorte de cul-de-sac qui fait comprendre la cause de leur complication exceptionnelle.

C'est ainsi encore que, le long des traits du second système localement accentués, se créent des *arêtes de rebroussement* dont, en dehors de la vallée de l'Arve, les Alpes et le Plateau Central offrent de nombreux exemples et qui introduisent des exceptions apparentes, soit à la loi de permanence des directions, soit à celle de la perpendicularité.

L'existence d'un réseau fixe de lignes de déformation, composé de méridiens et de parallèles, semble, au point de vue mécanique, fournir une solution satisfaisante du problème de la déformation d'une sphère lentement refroidie. On peut dès maintenant affirmer que les pôles de ce réseau ne coïncident pas exactement avec ceux de la rotation actuelle. Quand l'étude combinée des continents et des fonds de mer aura abouti à sa connaissance complète, si les exceptions aux règles constatées ne se montrent pas plus nombreuses dans d'autres régions, on peut espérer trouver dans cette voie un lien qui rattache la Géologie aux phénomènes plus précis de la Physique du globe et de l'Astronomie.

21289 Paris. — Imprimerie Gauthier-Villars et fils, quai des Grands-Augustins, 55.